

УДК 004.942:62-272.6

П.С. Швець, канд. техн. наук, А.В. Торопенко, канд. техн. наук,
В.Ш. Хуссаїн, С.М. Кошулян, Одеса, Україна

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Композиційні об'єкти створюються для отримання синергетичного ефекту від поєднання різних властивостей матеріалів. Це породжує багаточільові задачі оптимізації щодо вибору цих матеріалів та автоматизованого проектування структури та параметрів самих об'єктів. Звичайні методи розв'язання таких задач, – чисельні, аналітичні, – не підходять для складних об'єктів із нелінійними властивостями. Запропоновано метод віртуальних моделей в САПР композиційних об'єктів.

Ключові слова: композиційні об'єкти, віртуальні моделі

Композиционные объекты создаются для получения синергетического эффекта от сочетания различных свойств материалов. Это порождает многоцелевые задачи оптимизации выбора этих материалов и автоматизированного проектирования структуры и параметров самих объектов. Обычные методы решения таких задач, – численные, аналитические, – не подходят для сложных объектов с нелинейными свойствами. Предложен метод виртуальных моделей в САПР композиционных объектов.

Ключевые слова: композиционные объекты, виртуальные модели

The composite objects are created to obtain a synergistic effect from a combination of various properties of materials. This generates multi-purpose optimization tasks for selecting these materials and automated design of the structure and parameters of the objects themselves. The usual methods of solving such problems – numerical, analytical, – are not suitable for complex objects with nonlinear properties. The method of virtual models in CAD of composite objects is proposed.

Keywords: composite objects, virtual models

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науково-практичними завданнями

На сьогоднішній день в сучасній промисловості широко використовуються деталі та вузли, які або складені із різних за властивостями матеріалів, або, навіть із матеріалів, що нелінійно змінюють свої властивості в просторі або часі (анізотропні та такі, що регулюються) [1, 2]. Зрозуміло, що до проектування таких елементів, особливо автоматизованого, пред'являються значно суворіші умови з точки зору використання сучасних методів та адекватності оптимізаційних моделей. Адже досягнення синергетичного ефекту від використання в одній деталі багатьох різних за властивостями матеріалів потребує нових підходів до розв'язання задач оптимізації в САПР, безумовно, оптимізації багаточільової, багатовимірної та багатоекстремальної.

В той же час деякі існуючі методи такої оптимізації не отримали достатнього розвитку, що суттєво звужує можливості виробництва та негативно впливає на конкурентоспроможність його продукції. Зокрема, в статті йдеться про вдосконалення методу віртуальної моделі для оптимізації композиційних виробів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Існує клас деталей та вузлів машин, приладів, апаратів, тощо, в яких композиційність створюється навмисне при проектуванні або отримується мимовільно – як продукт оптимізації за зовсім іншими цільовими функціями виробу в цілому. До першого типу можна віднести електромеханічні фільтри та гумометалеві амортизатори, в яких на етапі проектування закладається максимальна спроможність поглинати ударні хвилі певних частот [3 - 5], а до другого – «штучний» механічний фільтр, який виникає поза спеціальними розрахунками та діє в транспортному засобі між дорогою та тілом людини [6 - 8].

Оскільки усі розрахункові задачі в САПР, як правило, обернені, – в них по заданих наслідках розраховують причини їхнього виникнення, – вони відрізняються некоректністю: прийнятного рішення може не бути взагалі, або таких рішень може бути кілька [9]. Ще одним недоліком методів оптимізації полі матеріальних об'єктів є те, що такі задачі не можна розв'язувати аналітичним або чисельним методами, оскільки вони, як правило, мають велику комп'ютерну складність. В той же час існують сучасні методи розв'язання подібних задач, в яких проектувальники вдаються до створення проміжних моделей об'єкта проектування із нездійсненними властивостями, – віртуальних об'єктів [10]. Віртуальність моделей таких об'єктів може торкатися конфігурації моделюємого об'єкта, нездійсненної в реальному житті [11], виконання об'єкта або його окремих частин із неіснуючих матеріалів [12], одночасного прикладання до об'єкта зовнішніх сил, які мають різне значення [10], тощо.

Але, на жаль, для багат шарових об'єктів методи віртуального моделювання не існують і потребують додаткової розробки.

Мета роботи

Метою роботи є підвищення якості автоматизованого проектування об'єктів транспорту, машинобудування, приладобудування, хімічної та харчової промисловості, які складаються із суттєво різних за властивостями елементів, за рахунок створення методу оптимізації структури та параметрів таких композиційних деталей та вузлів.

Для досягнення цієї мети в роботі були висунуті та розв'язані такі задачі:
– критично проаналізовані існуючі методи розв'язання задач оптимізації

структури та параметрів багатопарових об'єктів в САПР;

– удосконалено метод віртуальної моделі для використання в задачах оптимізації структури та параметрів багатопарових об'єктів в САПР;

– виконані випробування запропонованого методу при проектуванні гумометалевих виробів з позитивним техніко-економічним ефектом.

Викладення основного матеріалу

Аналітичний метод розв'язання задач оптимізації композиційних об'єктів

Розглянемо відносно просту задачу. Хай деякому впливу треба розповсюдитися від точки $(0; 0)$ (рис. 1) до точки із координатами $(x_A; L)$, долаючи при цьому шлях між цими точками крізь дві зони (I та II) двома відрізками прямих OX та XA .

Точка X завжди розташована на границі між зонами I та II, ширина яких, відповідно, l_I та l_{II} :

$$l_I + l_{II} = L, \quad (1)$$

Якщо властивості (наприклад, швидкість) перенесення впливу однакові ($v_I = v_{II} = v$) для обох зон, найшвидшим шляхом між O і A буде відрізок OA , а час його подолання, відповідно:

$$\tau = \frac{l_{OA}}{v}. \quad (2)$$

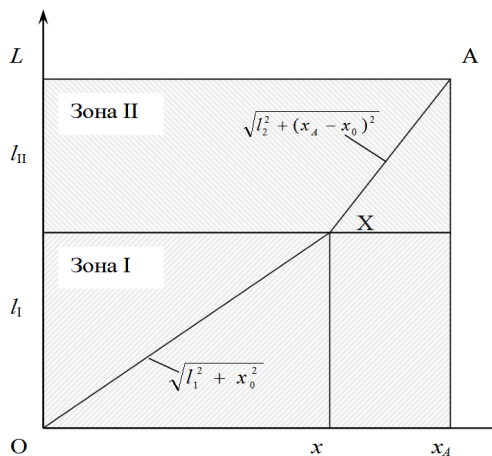


Рисунок 1 – Схема до розрахунку оптимального за часом шляху подолання двох зон із різними протяжністю та властивостями

Якщо швидкості v_I та v_{II} нерівні, «прямий» шлях ОА, з точки зору мінімуму часу, стає неоптимальним, і задача оптимізації зводиться до пошуку такої точки «перелому» шляху $X(l_I; x)$ при якій

$$\tau_I + \tau_{II} = \tau_{\min}. \quad (3)$$

Оскільки l_I – задане число, пошук зводиться до розрахунку $x_{\min} \rightarrow \tau_{\min}(x)$. Тепер сформулюємо задачу оптимізації. В загальному вигляді вона формулюється так:

$$x \in X: f(x) = \min_{x \in \{X\}} f(x). \quad (4)$$

Для одновимірного випадку вираз (4) виглядає таким чином:

$$x \in \{0; x_A\}: f(x^*) = \min_{x \in \{0; x_A\}} f(x). \quad (5)$$

Для побудови $f(x)$ згадаємо, що метою оптимізації в задачі (5) в нашому випадку є мінімізація часу перенесення впливу від О до А, а також, що цей час є сумою часу перенесення від точки О до точки Х і від точки Х до точки А із відповідними швидкостями:

$$\tau_I = \frac{l_I}{v_I}; \quad (6)$$

$$\tau_{II} = \frac{l_{II}}{v_{II}}; \quad (7)$$

$$\tau = \tau_I + \tau_{II}. \quad (8)$$

Таким чином, цільовою функцією оптимізації є час τ , а єдиним оптимізуючим аргументом – координата x точки Х. Інші характеристики (l_I , l_{II} , v_I , v_{II} , x_A) є в конкретному розрахунку сталими і можуть варіюватися в процесі зміни проєктованих параметрів у двоматеріальному об'єкті.

З рис. 1 та виразів (6) – (8) отримуємо:

$$\tau_I = \frac{\sqrt{l_I^2 + x^2}}{v_I}; \quad (9)$$

$$\tau_{II} = \frac{\sqrt{l_{II}^2 + (x_A + x)^2}}{v_{II}}; \quad (10)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{l_I^2 + x^2}}{v_I} + \frac{\sqrt{l_{II}^2 + (x_A + x)^2}}{v_{II}}. \quad (11)$$

Для розв'язання задачі оптимізації, побудованої із (5) та (11):

$$x \in \{0; x_A\}: f(x^*) = \min_{x \in \{0; x_A\}} \frac{\sqrt{l_I^2 + x^2}}{v_I} + \frac{\sqrt{l_{II}^2 + (x_A + x)^2}}{v_{II}}, \quad (12)$$

призначимо сталі: $l_I = 1$ м, $l_{II} = 2$ м, $v_I = 1$ м/с, $v_{II} = 0,5$ м/с, $x_A = 10$ м.

Тоді вираз (12) перетворюється на:

$$x \in \{0; x_A\}: f(x^*) = \min_{x \in \{0; x_A\}} (\sqrt{1 + x^2} + \sqrt{64 + 16(10 - x)^2}) \quad (13)$$

Оптимізацію виразу, який в (13) стоїть під знаком min, можна виконати двома способами.

Перший спосіб – аналітичний. Для цього візьмемо похідну:

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = \frac{x}{v_I \sqrt{l_I^2 + x^2}} + \frac{x_A - x}{v_{II} \sqrt{l_{II}^2 + (x_A - x)^2}} \quad (14)$$

та прирівняємо її до 0:

$$\frac{x^*}{v_I \sqrt{l_I^2 + x^{*2}}} + \frac{x_A - x^*}{v_{II} \sqrt{l_{II}^2 + (x_A - x^*)^2}} = 0. \quad (15)$$

Розв'язуючи рівняння (15) отримуємо значення $x^* = 9,12$ м, а відповідний йому мінімальний час $\tau_{\min}(x^*) = 17,928$ с.

На жаль, обчислювальний шлях лише до одного результату (а в САПР такі результати перебирають тисячами) в найпростішому випадку (дві зони, які складаються з ізотропних матеріалів) виявляється настільки великим, що його не можна рекомендувати до практичного використання.

Чисельний метод розв'язання задач оптимізації композиційних об'єктів

Скористаємося формулою (11) і будемо варіювати шукане значення x^* по дискретних значеннях $x = 0, 1, 3, 5, 7, 9$. Результати занесемо до табл. 1 (1 варіант)

Таблиця 1 – Результати наближеного розрахунку композиційного об'єкта

x , м	τ , с 1 варіант	τ , с 2 варіант
0	40,8	11,00
1	38,3	10,61
3	30,0	10,44
5	27,0	10,47
7	21,0	10,67
9	18,05	11,28
10	18,04	12,04

Як бачимо, оптимальне τ зменшується монотонно, і його найменше значення співпадає із $x = 10$, тобто точка X опиняється на межі допуску на своє існування. Це протирічить фізичному сенсу початкової задачі.

Змінимо сталі задачі на $l_I = 1$ м, $l_{II} = 2$ м, $v_I = v_{II} = 1$ м/с, $x_A = 10$ м. В цьому наборі властивості зон співпадають, а отже оптимальним шляхом між точками O та A є відрізок OA . Вираз (11) перетворюється на:

$$\tau = (\sqrt{1+x^2} + \sqrt{4+(10-x)^2}), \quad (16)$$

а розрахунки за ним представлені в табл. 1 (2 варіант). Як бачимо, в цьому прикладі $x = 3$ м (оскільки товщина зон різна).

Повертаємося до першого варіанту і виказуємо припущення, що значення x^* , яке мінімізує час, знаходиться між $x = 9$ м та $x = 10$ м. Будуємо табл. 2, в якій знаходимо цей оптимум: $x^* = 9,5$ м; $\tau_{\min}(x^*) = 17,798$ с.

Таблиця 2 – Результати уточнюючого розрахунку композиційного об'єкта

x , м	τ , с 1 варіант
9	18,5
9,1	17,928
9,5	17,798
10	18,04

Як бачимо, результат приблизно знайдено, але й цей, чисельний шлях виявляється досить складним навіть для найпростішого двохшарового варіанту. Більш точний результат розв'язання задачі (12) може бути знайдений, наприклад, методом підбору, що навіть для зовсім простої двовимірної задачі є математично складним випробуванням.

Метод віртуальної моделі оптимізації композиційних об'єктів

В попередніх прикладах розмірність задачі оптимізації дорівнювала двом. Перейдемо тепер до об'єктів із необмеженою розмірністю. Нехай об'єкт проектування Ω має тепер наступні атрибути:

\mathbf{x} – вектор розмірних параметрів (конфігурація);

λ – вектор характеристик матеріалів, з яких складається об'єкт;

\mathbf{q} – вектор зовнішніх впливів на об'єкт.

Якщо розглядати комплекс цих множин $\{\mathbf{x}, \lambda, \mathbf{q}\}$ як *параметрів-причин*, то *параметрами-наслідками або реакціями* може вважатися деякий вектор чисел \mathbf{r} , відповідний в деякому сенсі початковому об'єкту Ω :

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\mathbf{x}, \lambda, \mathbf{q}). \quad (17)$$

Задача (17) пряма: по трьом векторам-причинам знайти вектор-реакцію. До неї існують три обернені задачі.

1. За відомими реакцією \mathbf{r} , характеристикам λ і дії \mathbf{q} знайти конфігурацію \mathbf{x} :

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{r}, \lambda, \mathbf{q}). \quad (18)$$

2. За відомими реакцією \mathbf{r} , конфігурації \mathbf{x} і дії \mathbf{q} знайти характеристики λ :

$$\lambda = \lambda(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{q}). \quad (19)$$

3. За відомими реакцією \mathbf{r} , характеристикам λ і конфігурації \mathbf{x} знайти вплив \mathbf{q} :

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}(\mathbf{x}, \lambda, \mathbf{r}). \quad (20)$$

У проектуванні вирішуються перша і друга обернені задачі (18) і (19), в управлінні – третя (20).

Рішення цих задач неаналітичними методами, наприклад, методом перебору передбачає заміну однієї оберненої задачі (18), (19) або (20) деякою множиною прямих (17). При цьому, як сказано вище, розв'язуючий алгоритм різко ускладнюється, настільки ж різко зростає його часова складність. Зокрема, для проектування за допомогою зміни зовнішнього впливу $\Delta \mathbf{q}$ на об'єкт Ω вирішальний алгоритм підбору виглядає так [12]:

1 – вибрати деяке початкове рішення $\Delta \mathbf{q} = \Delta \mathbf{q}_{\text{поч}}$;

2 – вирішуючи пряму задачу (17), розрахувати $\mathbf{r}_{\text{поч}}(\Delta \mathbf{q}_{\text{поч}})$;

3 – визначити допустимість відхилення $\mathbf{r}_{\text{поч}}$ від області $\mathbf{r} \in \mathbf{R}$;

4 – якщо відхилення допустимо, зупинитися, якщо ні, – повернутися до п. 1, змінити $\Delta \mathbf{q}_{\text{поч}}$ і повторювати пп. 2 – 4 до зупинки.

Таким чином, рішення методом перебору припускає деякий «рух» в області визначення можливих зовнішніх впливів на об'єкт $\mathbf{q} \in \mathbf{Q}$. У

переважній більшості випадків проектування таких «рух» неможливий із-за особливостей параметра, вздовж якого необхідно рухатися. Наприклад, не завжди можливо вільно варіювати характеристики матеріалу, з якого планується виробити об'єкт. Для розв'язання цієї проблеми створюється *віртуальна* модель об'єкта проектування. В ній, допускаються різні, неможливі в реальному світі стани окремих елементів (рис. 2) [12].

Віртуальний об'єкт припускає рух в напрямку підбору квазіоптимальних рішень вздовж будь-якого параметра, незалежно від його доцільності і реальної можливості. Такий рух створює квазіоптимальну модель, для якої в реальному світі не існує відповідного до цієї моделі об'єкта.

Нехай для пошуку оптимальної конструкції деякого об'єкта необхідно «рухатися» уздовж параметра P_1 його моделі, але розв'язуючий алгоритм такий рух обмежує, наприклад, високою часовою складністю комп'ютерних обчислень (заборона А). Нехай рухом уздовж параметра P_2 моделі також можна оптимізувати управління об'єктом (назвемо цей процес квазіоптимізацією), але такий рух забороняє фізична основа об'єкта (заборона Б).

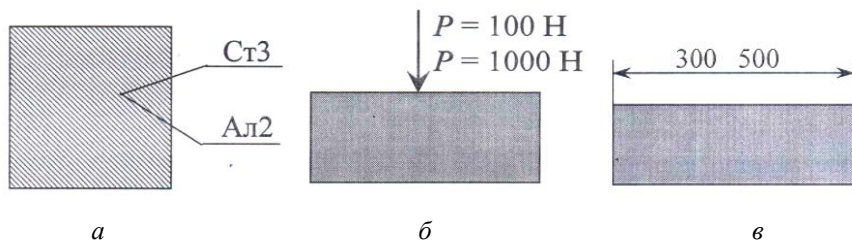


Рисунок 2 – Варіанти віртуальних об'єктів в механіці:

а – елемент *одночасно* виконаний зі сталі та алюмінію;

б – на елемент *одночасно в одній точці* діють різні за величиною сили;

в – елемент *одночасно* має різні значення *одного й того ж* розміру

У разі «звичайної» моделі в цих умовах доводиться рухатися, змінюючи P_1 , – адже така, що суперечить здоровому глузду, заборона Б нездоланна! Інша річ – якщо модель віртуальна, – в ній немає ніяких заборон! Тоді, рухаючись в напрямку P_2 всередині віртуальної моделі, знайдемо спочатку квазіоптимальний (віртуальний) керуючий вплив $\Delta q_{\text{кво}}$.

Далі має бути фінішний перехід від квазіоптимального впливу $\Delta q_{\text{кво}}$ до оптимального $\Delta q_{\text{опт}}$. Завдання вирішено і заборона А обійдена. Результат – значне зниження часової складності пошуку оптимального керуючого впливу. Таким чином, пропонується метод складається з двох етапів: квазіоптимізації і фінішного переходу.

Наведемо конкретний приклад. Розглянемо проектування матеріального об'єкта у вигляді багатошарової пластини (рис. 3). Необхідно спроектувати товщину та матеріал окремих пластин так, щоб пластина працювала в якості фільтра, який на шляху від джерела широкого спектра коливань Дж до приймача Пр подавляє деякий заданий спектр частот.

Для розрахунку параметрів розповсюдження коливань крізь цей об'єкт розглянемо віртуальну модель цього об'єкта, в якій джерело А випромінює коливання тільки однієї частоти, причому *одночасно різної*. Далі для кожного окремого шару обчислюємо таку частоту, яка найбільш відповідає умовам задачі. Фінішний перехід полягає у відтворенні фізично припустимого стану (частота єдина), що досягається відповідним перерахуванням товщин шарів об'єкта.

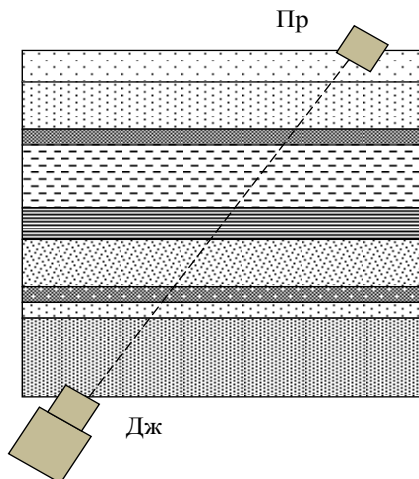


Рисунок 3 – Багатошарова пластина із різними властивостями окремих шарів:
Дж – джерело коливань; Пр – приймач коливань

Практичні випробування результатів дослідження

В ПАТ «Одеський завод гумових технічних виробів» було проведено випробування САПР процесу виготовлення композиційних виробів. В якості об'єкта проектування використовували технологічний процес лиття під тиском гумової суміші при виробництві гумометалевих амортизаторів типу АКСС-10М та КРМ (рис. 4, а, б).



Рисунок 4 – Гумометалеві композиційні вироби типу «Силовий композиційний елемент» (гумометалеві амортизатори): а – типу АКСС; б – типу КРМ

В результаті випробувань встановлено, що використання процесу виготовлення композиційних виробів дозволило знизити відсоток браку в партії гумометалевих амортизаторів АКСС-10М та КРМ на 39,14 % при забезпеченні заданих властивостей деталі.

Висновки

В результаті аналізу існуючих методів розв'язання задач проектування структури та параметрів багат шарових об'єктів в САПР встановлено, що обчислювальна складність виникаючих при цьому задач оптимізації не завжди дозволяє застосовувати для цього «звичайні» аналітичні та чисельні методи.

Наведені приклади постановки та розв'язання таких задач для композиційних об'єктів за допомогою методу віртуальної моделі. Метод дозволяє уникнути складних обчислень в напрямку підбору реальних параметрів і замінити їх на створення «неможливих» віртуальних характеристик об'єктів із подальшим перерахуванням їх до реального результату проектування.

Розроблені методи та моделі дозволили запропонувати нові підсистеми та створити загальну САПР, призначену для автоматизованого проектування композиційних виробів будь-яких видів та складів матеріалів, які входять до композиції та технології їхнього виготовлення [14]. В результаті випробувань цієї САПР знижено відсоток браку в партії гумометалевих амортизаторів АКСС-10М та КРМ на 39,14 % при забезпеченні заданих властивостей проєктованих деталей.

Перспективи подальшого розвитку

Результати дослідження підтверджують практичну можливість використання методу віртуальної моделі при оптимізації композиційних об'єктів в САПР.

Метод може бути застосований при проектуванні конструкцій та технологічних процесів виготовлення досить складних за будовою та досить відповідальних за призначенням композиційних поліматеріальних деталей.

Список використаних джерел: 1. *Становская, Т. П.* Подвеска транспортного средства как нелинейный фильтр / Т.П. Становская, О.С. Савельева и др. // Материалы XII семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 2005. – С. 63-64. 2. *Становський, О.Л.* Автоматизоване проектування технології виготовлення гумовометалевих виробів / О.Л. Становський, Е.Ю. Лебедева и др. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Процессы управления. – Харьков, 2015. – № 5/1 (77). – С. 23-28. 3. *Лосев, А.К.* Теория и расчет электромеханических фильтров / А.К. Лосев – М.: Связь, 1965. – 262 с. 4. *Павлов, А. Н.* Высокодобротный электромеханический фильтр низкочастотных сигналов / А. Н. Павлов // Измерительная техника. – 2003. – № 10. – С. 39-40. 5. *Shvets, P.S.* The computer-aided design of rubber-metal products / P.S. Shvets, O.Yu. Lebedeva and oth. // Праці Одеського національного політехнічного університету. – Одесса: ОНПУ, 2015. – С. 63 – 72. 6. *Балан, С.А.* Моделирование передаточных частотных характеристик элементов автотранспортных средств / С.А. Балан, Т.П. Становская и др. // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – Вып. 3. – С. 71-73. 7. *Балан, С.А.* Метод виртуального объекта в управлении тормозными системами с внутренней виброзащитой / С.А. Балан, Т.П. Становская и др. // Труды Одесского политехнического университета. – 2000. – Вып. 2. – С.29-32. 8. *Сидоренко, И.И.* Активная виброзащитная система с механической обратной связью по величине передаваемой нагрузки / И.И. Сидоренко // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – № 2(8). – С. 51-54. 9. *Гончарова, О. Е.* Нечувствительный к асимметрии численный метод оптимизации конструкций / О.Е. Гончарова, В.Г. Максимов и др. // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – Вып. 2 (8). – С. 41 – 44. 10. *Балан, С.А.* Метод виртуального объекта в проектировании / С. А. Балан, Т. П. Становская и др. // Труды Одесского политехнического университета. – 2000. – Вып. 1. – С. 32-35. 11. *Становський, А. Л.* Метод виртуальної моделі в метрологічному забезпеченні автоматизованого проектування та управління / А.Л. Становський, Л.В. Бовнегра и др. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии. – Харьков, 2015 – № 2/9 (74). – С. 30-35. 12. *Балан, С.А.* Применение метода виртуального объекта в машиностроении: тр. VII семинара / С.А. Балан, Т.П. Становская и др. // Моделирование в прикладных научных исследованиях. – Одесса: ОГПУ, 2000. – С. 12-16. 13. *Хемди, А. Таха.* Введение в исследование операций. Operations Research: An Introduction / А. Таха Хемди. – 8 изд. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с. 14. Моделивання та оптимізація поліматеріальних об'єктів в САПР за допомогою методу віртуальної моделі / О.Л. Становський, В. Ш. Хуссейн, О. Ю. Лебедева та ін. // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків, 2017. – № 16(1238). – С. 61-67.

Bibliography (transliterated): 1. *Stanovskaja, T. P.* Podveska transportnogo sredstva kak nelinejnij fil'tr / T. P. Stanovskaja, O. S. Savel'eva i dr. // Materialy XII seminar «Modelirovanie v prikladnyh nauchnyh issledovanijah». – Odessa: ONPU, 2005. – S. 63-64. 2. *Stanovskij, O. L.* Avtomatizovane proektuvannja tehnologii vigotovlennja gumovometalevih virobiv / O. L. Stanovskij, E. Ju. Lebedeva i dr. // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. Processy upravlenija. – Har'kov, 2015. – № 5/1 (77). – S. 23-28. 3. *Losev, A. K.* Teorija i raschet jelektromehaničeskikh fil'trov / A. K. Losev – M.: Svjaz', 1965. – 262 s. 4. *Pavlov, A. N.* Vysokodobrotnyj jelektromehaničeskij fil'tr

- nizkochastotnyh signalov / A. N. Pavlov // Izmeritel'naja tehnika. – 2003. – № 10. – S. 39-40.
5. *Shvets, P. S.* The computer-aided design of rubber-metal products / P. S. Shvets, O. Yu. Lebedeva and oth. // Praci Odes'kogo nacional'nogo politehnichnogo universitetu. – Odessa: ONPU, 2015. – S. 63-72.
6. *Balan, S. A.* Modelirovanie peredatochnykh chastotnykh karakteristik jelementov avtotransportnykh sredstv / S. A. Balan, T. P. Stanovskaja i dr. // Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 1999. – Vyp. 3. – S. 71 – 73.
7. *Balan, S. A.* Metod virtual'nogo ob'ekta v upravlenii tormoznymi sistemami s vnutrennej vibrozashhitoy / S. A. Balan, T. P. Stanovskaja i dr. // Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 2000. – Vyp. 2. – S.29 – 32.
8. *Sidorenko, I. I.* Aktivnaja vibrozashhitnaja sistema s mehanicheskoy obratnoj svjaz'ju po velichine predavaemoj nagruzki / I. I. Sidorenko // Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 1999. – № 2(8). – S. 51-54.
9. *Goncharova, O. E.* Nechuvstvitel'nyj k asimmetrii chislennyj metod optimizacii konstrukcij / O. E. Goncharova, V. G. Maksimov i dr. // Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 1999. – Vyp. 2 (8). – S. 41-44.
10. *Balan, S. A.* Metod virtual'nogo ob'ekta v proektirovanii / S. A. Balan, T. P. Stanovskaja i dr. // Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 2000. – Vyp. 1. – S. 32-35.
11. *Stanovskij, A. L.* Metod virtual'noj modeli v metrologicheskom obespechenii avtomatizirovannogo proektirovanija i upravlenija / A.L. Stanovskij, L.V. Bovnagra i dr. // Vostochno-evropejskij zhurnal передовyh tehnologij. Informacionnye tehnologii. – Har'kov, 2015 – № 2/9 (74). – S. 30-35.
12. *Balan, S. A.* Primenenie metoda virtual'nogo ob'ekta v mashinostroenii: tr. VII seminaru / S. A. Balan, T. P. Stanovskaja i dr. // Modelirovanie v prikladnyh nauchnyh issledovanijah. – Odessa: OGPU, 2000. – S. 12-16.
13. *Hemdi, A. Taha.* Vvedenie v issledovanie operacij. Operations Research: An Introduction / A. Taha Hemdi. – 8 izd. – M.: Vil'jams, 2007. – 912 s.
14. Modeljuvannja ta optimizacija polimaterial'nih ob'ektiv v SAPR za dopomoguju metoda virtual'noї modeli / O. L. Stanovskij, V. Sh. Hussain, O. Ju. Lebedeva ta in. // Visnik NTU «HPI», Serija: Mehaniko-tehnologichni sistemi ta kompleksi. – Harkiv, 2017. – No 16(1238). – S. 61-67.